干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

半干旱区降水和水土保持措施强度-径流演变规律研究

胡彦婷[1]， 张 富[1]， 罗珠珠[2,3]， 靳 峰[4]， 周 蕊[5]， 赵秀兰[1]， 包炳琛[1]

（1 甘肃农业大学林学院，甘肃 兰州 730070； 2 甘肃省干旱生境作物学国家重点实验室/甘肃农业大学，甘肃 兰州 730070； 3 甘肃农业大学资源与环境学院，甘肃 兰州 730070； 4 甘肃省水利厅，甘肃 兰州 730000； 5 甘肃省水土保持科学研究所，甘肃 兰州 730000）

摘 要： 为研究不同时期及水土保持措施条件下，降水量、水土保持措施强度与径流的演变规律，运用泰森多边形法、Morlet小波分析法、回归分析法，构建多元功效函数，进行甘肃省定西市安定区近60 a年降水量、措施强度与径流演变研究。结果表明：1957—2016年年径流量呈递减趋势，达极显著水平（$P<0.001$）；在22～24 a、8 a、4 a时间尺度上，年降水量和径流具有明显的震荡周期，平均周期为15 a、5 a、3 a左右。梯田、造林、种草及封育等水土保持措施强度逐年递增，分别达36.14 $hm^2 \cdot km^{-2}$、25.26 $hm^2 \cdot km^{-2}$、11.56 $hm^2 \cdot km^{-2}$和3.22 $hm^2 \cdot km^{-2}$。随周期（3 a、5 a、15 a）的变长，同等降水量对产流量影响有所增大；同等水土保持措施强度对产流量影响有所减小；降水量和措施强度组合解释了径流模数总方差的57.46%～85.80%；降水量对径流模数的影响约低于40%，措施强度的影响约高于60%，说明措施强度对径流的影响较降水量更大。近60 a径流量的减少，主要是由于水土保持措施的递增引起。

关 键 词： 演变规律；降水量；水土保持措施强度；径流；半干旱区

文章编号：

近60 a外界环境变化下的径流演变及归因分析，特别是定量化分析降水量和土地利用/水土保持措施对径流影响，仍是目前评价水文时空分布、水文循环的重点研究内容[1-5]。水文与水资源的时间、空间分布直接受径流变化的影响，引起河流系统演变[6]。降水量是影响气候变化和土壤侵蚀的关键因子，降水时空分布结构的变化对河流系统的产流量产生影响，半干旱区长序列时间降水与径流相关[7-8]，气候变化中降水量对径流的影响最显著，水土保持措施作为人类活动因子之一，水土保持措施能够有效地减少和拦蓄未治理地的径流量[9-12]，也可以通过增加入渗和地下水补给减少地表径流[13]。刘剑宇等[12]采用Budyko水热耦合方程结合Penman-Monteith公式，分析了我国气候变化及人类活动对径流演变的影响，研究发现降水和人类活动（LUCC）因子对径流的响应最为敏感，降水对径流变化的贡献率为53.5%、人类活动为46.5%，特别是2000年以后，土地利用方式对径流变化的贡献率已多于二分之一，且影响更为剧烈[14-15]。刘纪根等[16]在研究鹤鸣观小流域的水土保持措施对流域径流的影响，结果表明：治理后期，降水、产流量变化率均减小，随降水量增加，水土保持措施对径流的影响效应增强；暴雨强度愈小，降水量愈少，径流拦蓄作用愈显著。

张富等[17]研究黄土丘陵沟壑区小流域尺度上坝库泥沙淤积与土地利用方式的关系，发现水土保持措施可显著减少泥沙量，单项水土保持措施数量与产沙量呈非线性关系，而且随着水土保持措施数量的变化，所发挥的拦蓄减蚀作用不同，梯田拦蓄减蚀能力大于林草地，但未涉及降水的影响。同时ZHANG等[18]还研究了祖厉河流域不同水土保持措施与水沙变化关系，表明年降水量、汛期降水量与

收稿日期： 2019-10-19； **修订日期：** 2020-01-13

基金项目： 甘肃农业大学科技创新基金项目（GSAU-XKJS-2018-105）

作者简介： 胡彦婷（1991-），女，甘肃天水人，博士，主要从事半干旱区水文研究. E-mail: hyt10170909@163.com

通讯作者： 张富（1961-），男，博士，研究员，主要从事半干旱区不同尺度土壤侵蚀研究. E-mail: fuzhang001@163.com

径流、输沙具有较好的线性、幂函数、二次方程，单项及综合水土保持措施与径流、输沙具有较好的幂函数关系。研究不同时期气候条件(主要是降水)、水土保持措施等影响因子的产流机制，完善不同尺度水土流失发生机理、机制方法，构建多尺度、多因子侵蚀模型，分析不同时空尺度条件下水土流失过程及结果，是土壤水蚀过程研究的弱点及难点问题。

1 研究区概况

安定区位于甘肃省的中部偏南，属祖厉河流域。地处104°12′48″~105°01′06″E，35°17′54″~36°02′40″N，土地总面积达3 638.71 km²，其中水土流失面积为1 573.65 km²，占土地总面积的43.25%。安定区气候类型属温带大陆性气候，气候在四季差异较大，温差显著。降水量少而集中，年均降水量达到415.6 mm，其年平均蒸发量为1 529.4 mm。安定区存在干旱少雨，水土流失较严重，生态环境脆弱等特征，是全省贫困县(区)之一。以水力侵蚀和重力侵蚀为主要水土流失类型。至2016年底，坡面工程措施：修建梯田13.17×10⁴ hm²；坡面林草措施：造林9.21×10⁴ hm²，种草4.21×10⁴ hm²，治理程度达到76.18%。

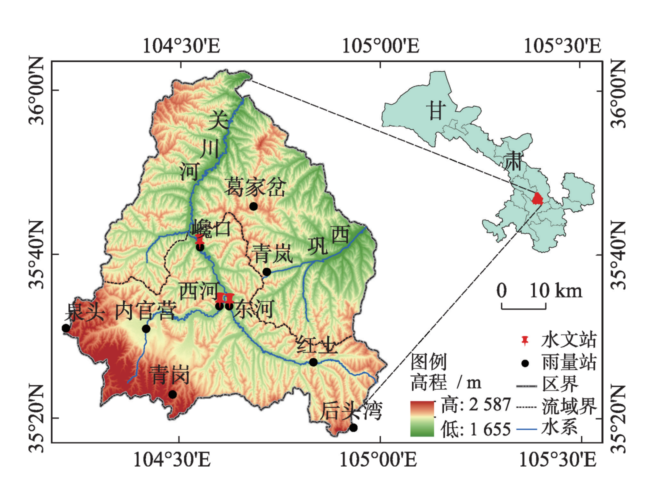


图1 安定区地理位置及观测站点分布图

Fig. 1 Geographical location and observation site distribution map of Anding District

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源及预处理

(1) 降水量和径流量数据 1957—2016年的年降水量、年径流量数据来源于甘肃省水文水资源局及定西市水文水资源局。10个研究区的雨量观测站分别为内官营、红土、青岗、西河及周边的青岚、泉头、后头湾(1957—2016年)，采用泰森多边形法确定其平均降水量。研究区水文观测站建在巉口(1957—1999年)，2000年开始上迁至定西市的东河、西河两处，故研究区1957—1999年径流来源于巉口站观测资料，从2000年开始来源于定西市的东河、西河站资料(2000—2016年)，使用面积加权平均法确定径流量。

(2) 水土保持措施数据主要来源于① 统计年鉴及水土保持年报(1957—2016年)；② 土地一调、二调及年度更新数据(1991年，2005—2016年)；③ 林业部门的林地详查数据(2009年、2014年、2016年)和退耕还林数据(2000—2006年、2014—2016年)。

2.2 研究方法

2.2.1 *泰森多边形法* 在降水量数据处理中应用广泛的泰森多边形法[19-20]，依据观测数据和多边形的面积，计算其加权平均值，确定面降水量。

2.2.2 *周期分析* 小波分析是一种具有时-频多变化周期的分析方法，是研究水文时间序列变异的有效依据[21]，Nakken[22]将小波变换应用到降水、径流量及两者关系的时间序列变化中，运用小波分析的关键是选择合适的基小波函数，运用Morlet小波[23-24]得出小波系数等值线图及小波方差图来研究年降水量、径流时间序列周期性的多时间尺度特征。

2.2.3 *回归分析* 采用SPSS 20，进行自变量、因变量之间的回归分析。对水土保持措施与径流模数进行多元回归分析，确定影响因子对径流的影响大小。以幂函数 $Y=X_i^{b_i}$ 为基础，构建多元功效函数。当 $b_i>0$(为正值时)，函数的图像在区间[0，+∞)上是增函数；$b_i>1$时，导数值逐渐增大；$0<b_i<1$时，导数值逐渐减小，趋近于0；当 $b_i<0$(为负值时)，函数图像在区间(0，+∞)上是减函数；有两条渐近线，自变量趋近0，函数值趋近+∞，自变量趋近+∞，函数值趋近0。

3 结果与分析

3.1 降水变化特征分析

3.1.1 *年际间降水变化特征分析* 1957—2016年年降水量和汛期降水量没有明显的增减变化趋势，年均降水量为415.6 mm。年最大降水量为715.6 mm；

年最小降水量为268.4 mm。汛期降水量大约占年降水量80%以上，说明全年降水量主要集中于汛期（图2）。

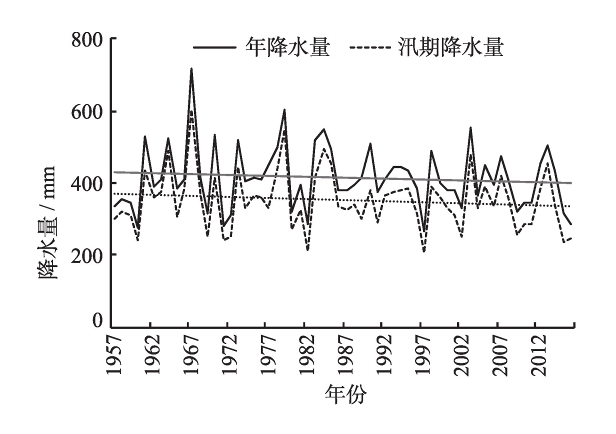


图2　1957—2016年降水量

Fig. 2　Annual precipitation from 1957 to 2016

3.1.2　降水量周期变化分析

（1）年降水量时频变化小波系数实部等值线图显示1957—2016年序列年降水量的时频尺度变化。由图3a可知，图中粗实线的等值线是小波系数为零值，表示降水量多-少的突变线；细实线的等值线是小波系数为正值，表示降水量处于多雨期；细虚线的等值线是小波系数为负值，表示降水量处于少雨期。降水量的周期变化存在18～32 a、12～18 a、6～12 a和3～6 a共4种时间尺度。在整个分析时间序列内18～32 a尺度的多-少周期变化表现平稳，具有全域性。图3b是小波系数模方等值线图，22～32 a尺度能量最强，周期震荡最明显，且周期变化具有局限性适用于1980年之前和1996年之后，6～12 a尺度能量较弱，但周期变化较明显，占研究时段的1961—2016年，3～6 a周期震荡次之，其他时间尺度周期震荡不明显。分析结果与上述18～32 a和6～12 a周期变化分析基本相一致。

（2）小波方差检验图以波动能量随着时间尺度变化，同时可确定降水过程中主周期。由小波方差图（图4a）可知，存在5个波峰，其中3个波峰较为明显，依次对应的时间尺度分别为4 a、8 a和22 a，时间尺度22 a对应的波峰值最大，表明22 a左右周期振幅最强，是第一主周期；时间尺度8 a对应的波峰值较大，表明8 a左右周期振幅较强，是第二主周期；4 a为第三主周期。上述22 a、8 a和4 a主周期控

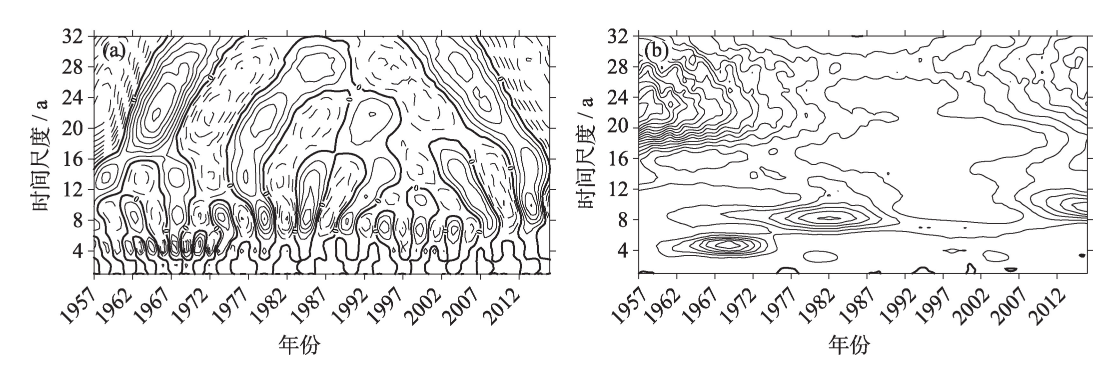


图3　年降水量小波系数实部等值线图(a)及模方图(b)

Fig. 3　Isopleth map of wavelet real part (a) and squared absolute value (b) of annual precipitation

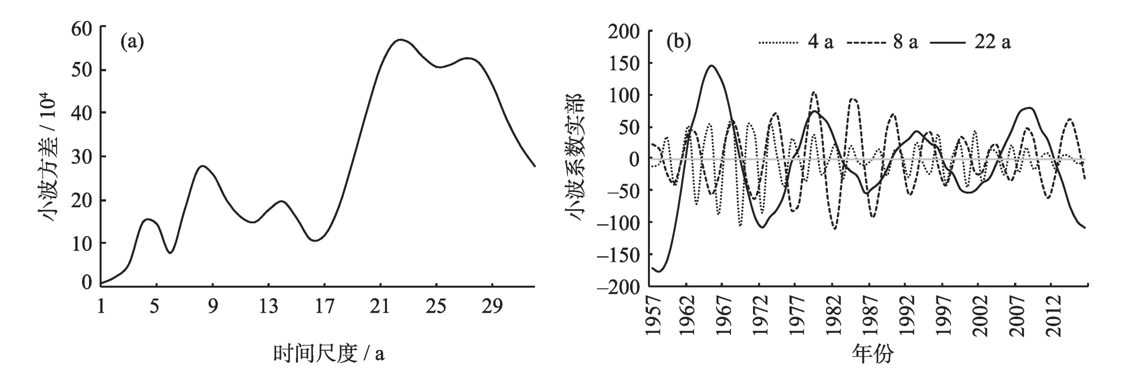


图4　年降水量小波方差分析(a)及小波周期分析图(b)

Fig. 4　Curves of wavelet variance (a) and period analysis (b) of precipitation

制着整个流域内时间序列的变化，小波能量分析范围包含小波方差主周期分析结果。

（3）不同周期年降水量变化特征分析依据上述小波方差检验结果，绘制控制整个流域内时间序列变化较强主周期的小波系数实部图，分析主周期不同时间尺度的平均周期和降水量多-少变化情况。由图4b可知，小波系数实部为正值，表示降水量处于多雨期，小波系数实部为负值，表示降水量处于少雨期，在22 a时间尺度中，降水变化的平均周期为15 a左右；在8 a尺度上，降水变化的平均周期为5 a左右；4 a尺度上，降水变化的平均周期为3 a左右。

3.2 径流模数变化特征分析

3.2.1 径流模数年际变化特征分析 年均径流模数为1.198×10^4 m^3·km^{-2}·a^{-1})，最大径流模数达到4.522×10^4 m^3·km^{-2}，为最大降水量出现年份（1967年）；最小径流模数为0.056×10^4 m^3·km^{-2}（2011年）。汛期径流模数占年径流模数的70%以上（除少数年份为70%以下），见图5。

3.2.2 径流周期变化分析

（1）径流模数变化时频尺度分析研究时间尺度径流小波系数实部等值线图（图6a），显示年径流的时频尺度变化。径流的周期变化存在4种尺度：18～32 a、12～18 a、6～12 a和3～6 a，在整个分析时间序列内18～32 a、6～12 a尺度的丰-枯周期变化表现平稳，具有全域性。图6b是小波系数模方等值线图，22～32 a尺度能量最强，周期震荡最明显，且周期变化具有局限性适用于1997年之前，6～12 a尺度能量较强，周期变化较明显，占研究时段的1957—2014年，12～18 a周期震荡次之，其他时间尺度周期震荡不明显。分析结果与上述18～32 a和6～12 a周期变化分析基本一致。

（2）小波方差检验由小波方差图（图7a）可知，存在3个波峰，依次对应的时间尺度分别为4 a、8 a和24 a，时间尺度24 a对应的波峰值最大，表明24 a左右周期振幅最强，是第一主周期；时间尺度8 a对应的波峰值较大，表明8 a左右周期振幅较强，是第二主周期；4 a为第三主周期。上述24 a、8 a和4 a主周期控制着整个流域内时间序列径流的变化，小波能量分析范围包含小波方差主周期分析结果。

（3）不同周期年径流模数变化特征分析依据上述小波方差检验结果，绘制控制整个流域内时间序列径流变化较强主周期的小波系数实部图，分析主周期不同时间尺度的平均周期和径流丰-枯变化情况。由图7b可知，小波系数实部为正值，表示径流处于丰水期，小波系数实部为负值，表示径流处于枯水期，在24 a时间尺度中，径流变化的平均周期为15 a左右，约出现4个枯-丰突变期，振幅在1967年达最大，1967年之后振幅在不断减小；8 a尺度上，径流变化的平均周期为5 a左右，约出现了12个枯-丰突变期，振幅在整个时间序列上出现先增后减的趋势，1957—1979年振幅逐渐增大，1979—2016年振

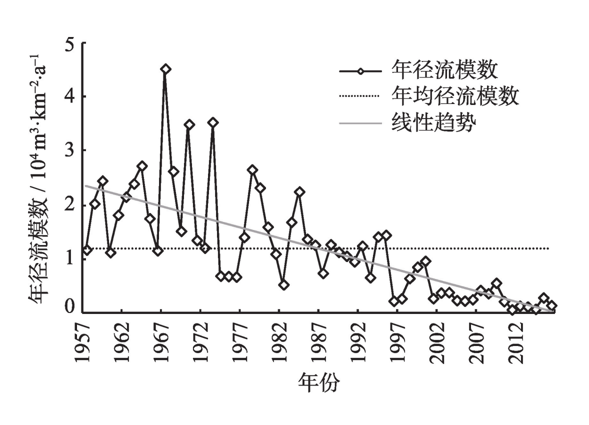


图5 1957—2016年径流模数图

Fig. 5 Annual runoff modulus change from 1957 to 2016

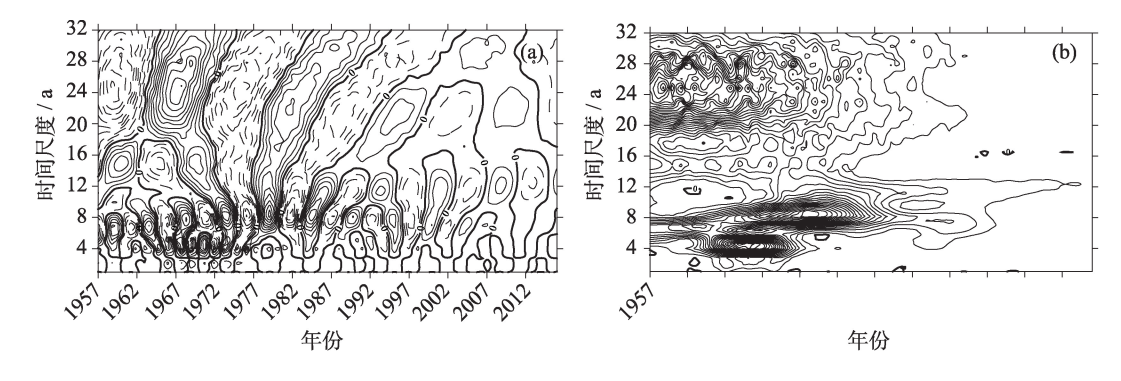


图6 年径流小波系数实部等值线图(a)及模方图(b)

Fig. 6 Isopleth map of wavelet real part (a) and squared absolute value (b) of annual runoff

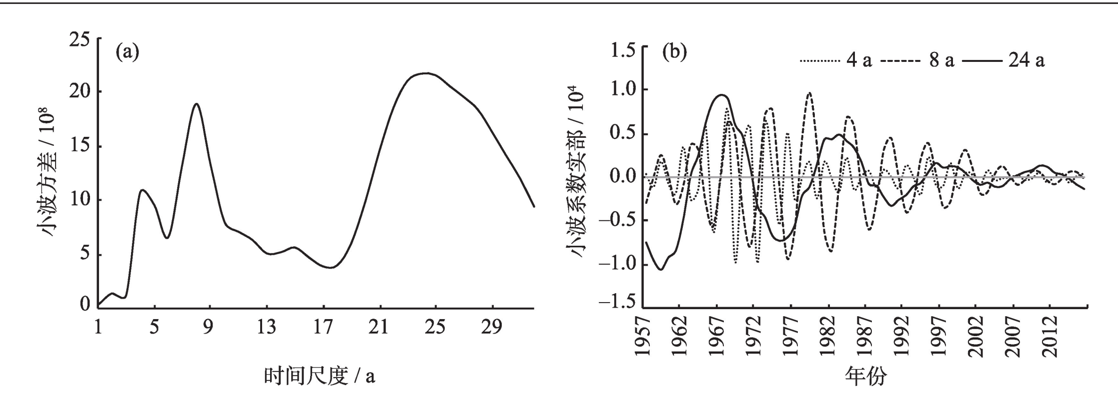


图7 年径流小波分析方差(a)及主周期图(b)

Fig. 7 Curves of wavelet variance (a) and period analysis (b) on annual discharge

幅逐渐减小；4 a尺度上，径流变化的平均周期为3 a左右，约出现了20个枯-丰突变期，振幅在整个时间序列上呈现先增后减的趋势，1957—1968年振幅逐渐增大，1968—2016年振幅逐渐减小。

3.3 水土保持措施强度变化

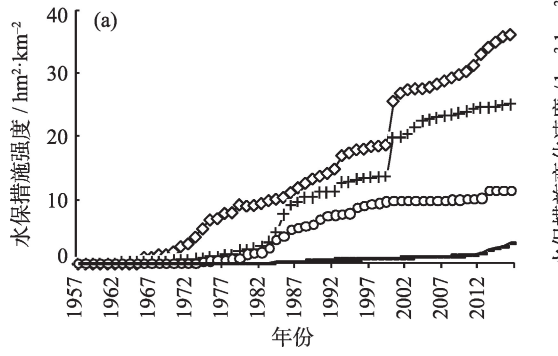
1957—2016年研究区水土保持措施主要是梯田、造林、种草及封育治理，截止2016年底，措施强度分别达36.14 hm^2·km^{-2}、25.26 hm^2·km^{-2}、11.56 hm^2·km^{-2}和3.22 hm^2·km^{-2}。由图8可知，水土保持措施强度随治理年限增加，且梯田、造林具有明显阶段特征，说明不同时段水土保持措施增量变化较大；而种草及封育治理变化幅度较小。坡面措施中，梯田的平均强度为14.25 hm^2·km^{-2}，造林和种草措施的平均强度分别为10.05 hm^2·km^{-2}、5.05 hm^2·km^{-2}，封育治理措施的平均强度为0.57 hm^2·km^{-2}。坡面措施中梯田的年均增速最大，为0.61 hm^2·km^{-2}，其次为造林和种草。

3.4 不同周期降水量、水土保持措施强度与径流模数关系分析

（1）不同周期影响因子与径流模数动态变化上述研究表明降水量、径流模数二者具有相同的平均变化周期（3 a、5 a和15 a），在时间序列上降水量没有明显的增减变化趋势，但径流模数呈明显的减小趋势，水土保持措施强度具有明显的增加趋势。为了解不同周期降水量、措施强度与径流模数的关系，分析自变量对因变量的影响大小，以降水量、措施强度为自变量，径流模数为因变量建立了多元回归模型。结果表明，不同周期回归模型均达极显著水平（$P<0.001$），随周期的变长，相关性（r）、检验值（F）增大（见表1）。

在[3 a，15 a]区间上随3 a、5 a和15 a周期的变长，降水量（X_1）回归系数$b_1>1$的水平上增大，说明在同等措施强度下周期变长、平均降水量增大，径流模数（Y）增加；在同等降水量下周期变长，措施强度（X_2）的回归系数$b_2<0$的水平上逐渐变小，说明周期变长、措施强度增大，将导致径流模数（Y）逐渐降低。

（2）不同周期影响因子对径流模数影响分析标准回归系数（绝对值）的大小，反映了自变量对因变量影响的大小，正负号反映了增加或减少的趋势。降水量、措施强度与径流模数标准回归系数分析表



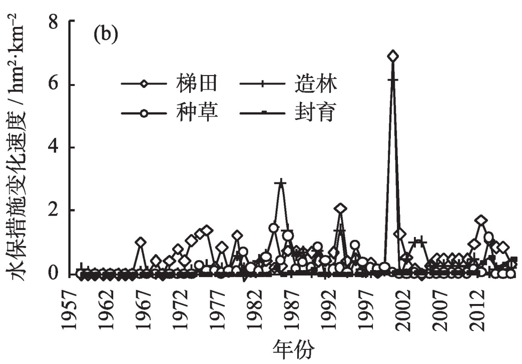


图8 水土保持措施强度及变化速度曲线图

Fig. 8 Intensity of control measures and rate change

表1　不同周期降水量、措施强度与径流模数回归方程

Tab. 1　Regression equation of annual precipitation, intensity of measures and runoff modulus at different periods

周期 / a	方程	r	R^2	F
3	$Y=0.12 \cdot X_1^{2.01} \cdot X_2^{-0.35}$	0.76	0.58	37.15
5	$Y=6.12\times10^{-5} \cdot X_1^{3.26} \cdot X_2^{-0.33}$	0.79	0.63	44.58
15	$Y=1.72\times10^{-18} \cdot X_1^{8.45} \cdot X_2^{-0.32}$	0.93	0.86	129.90

注：Y为径流模数，$m^3 \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$；$X_1$为降水量，mm；$X_2$为措施强度，$hm^2 \cdot km^{-2}$

明，随3 a、5 a、15 a周期变长，降水量和措施强度组合解释了径流模数总方差的57.46%～85.80%，降水量对径流模数的影响由23.46%增为44.09%，措施强度的影响由71.34%降为61.15%；说明措施强度对径流的影响作用超过降水因子的驱动，在1957—2016年60 a降水量没有显著变化的情况下，径流模数不断降低，是由于水土保持措施强度增加所导致（见表2）。

表2　不同周期降水量、措施强度与径流模数标准回归系数

Tab. 2　Standard regression coefficient of annual precipitation, intensity of measures and runoff modulus at different periods

系数	不同周期标准回归系数		
	3 a	5 a	15 a
b_1'	0.23	0.26	0.44
b_2'	−0.71	−0.70	−0.61
R^2	0.57	0.63	0.86

注：b_1'、b_2'分别为年降水量、措施强度标准回归系数

4　讨论

径流模数与降水量关系。1957—2016年年径流模数呈递减趋势。在年降水量与径流模数的关联性上，1957—1985年径流对降水量变化响应强烈，趋势协同性强，相关性好；1986—2016年径流对降水量变化响应迅速衰减，年趋弱化、趋势协同异化，见图9a。说明径流模数变化受其他因素影响越来越大，尤其是2000年之后受降水量的影响更小，一方面与水土保持措施梯田、造林、种草、封育等实施紧密关联，另一方面，研究区从1995年开始建立小规模的试验淤地坝，2000—2016年大规模建立沟道工程淤地坝，达155座，有研究黄土高原的皇甫川流域发现，淤地坝引起了40%以上的径流减少[25]。在赤峰市锡林河流域研究发现春季融雪径流占全年总径流量的52.32%[26]，而夏季易形成多短时强对流天气，使强降水集中于下午[27]，在疏勒河流域夏季径流增加对年径流量影响最大[28]。由此看出不同区域由于地域差异性、环境复杂性，影响径流的因子各有差异，径流变化除受降水量、冰川融雪、水土保持坡面措施、沟道工程外，还可能受气温、蒸散发、地下水波动等多种因子的综合影响[29]。

径流模数与水土保持措施强度关系。1957—1985年在措施强度较小时期，径流对措施强度变化响应低，无趋势协同性；1986—2016年随措施强度增加，径流对措施强度变化响应增加，趋势协同异化，见图9b。说明径流模数变化受水土保持措施强度影响越来越大。特别是2000年后大力实施退耕

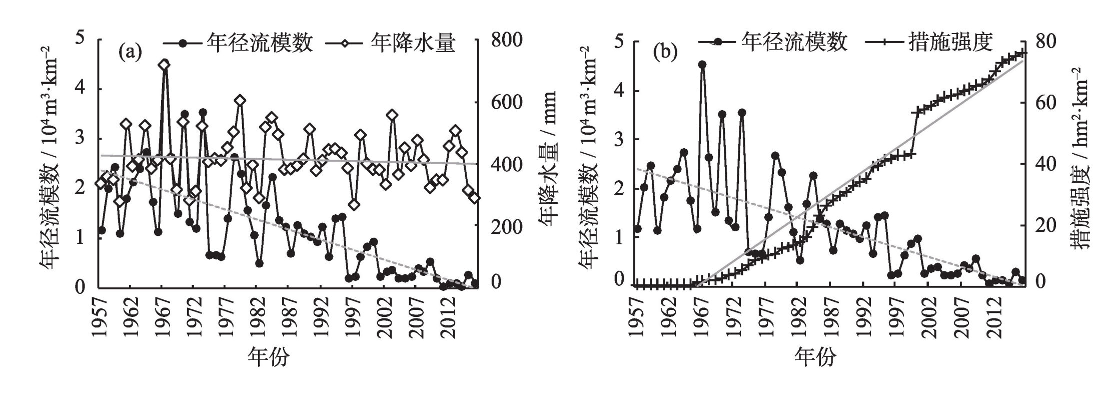


图9　年径流模数与年降水量(a)、措施强度(b)关系

Fig. 9　Relationship between the annual runoff modulus to annual precipitation (a) and the intensity of control measures (b)

还林还草、坡改梯、沟道工程等[25,30]，使径流量急剧下降，水土保持措施有效拦蓄地表径流，与秦瑞杰[31]、夏露[32]等在黄土丘陵区的水沙关系研究结果基本一致。

分析不同变化周期下降水、水土保持措施强度与径流的关系发现，随3 a、5 a和15 a周期的变长，降水量的回归及标准系数绝对值增大，说明同等降水量，周期年限的延长，产生的径流有所增大，降水量对径流的影响逐渐增加；相反，同等措施强度，随着周期年限的延长，水土保持措施拦蓄能力逐步降低，单位面积拦蓄径流减少，水土保持措施对径流的影响逐渐减小。

5 结 论

本研究对安定区1957—2016年年降水量、水土保持措施强度、径流特征、变化趋势，及年降水量、措施强度与径流相关关系进行分析，主要研究结论如下：

（1）径流与年降水量变化。1957—2016年年降水量没有明显的变化趋势，但年降水量在22 a、8 a、4 a时间尺度上，具有明显的震荡周期；而径流模数呈递减趋势，递减幅度达极显著水平（$P < 0.001$），径流在24 a、8 a、4 a时间尺度上，具有明显的震荡周期。平均时间周期均为15 a、5 a、3 a左右。

（2）径流与措施强度变化。随水土流失治理工作的推进，梯田、造林、种草及封育等水土保持措施强度逐年增加，分别达到36.14 $hm^2 \cdot km^{-2}$、25.26 $hm^2 \cdot km^{-2}$、11.56 $hm^2 \cdot km^{-2}$和3.22 $hm^2 \cdot km^{-2}$；随措施强度增加，径流模数递减，水土保持措施是影响径流模数的主要因子。

（3）年降水量、措施强度对径流的影响分析。随周期（3 a、5 a、15 a）变长，同等降水量，径流模数有所增大；同等措施强度，径流模数减小；降水量和措施强度组合解释了径流模数总方差的57.46%～85.80%（$P < 0.001$），水土保持措施强度对径流的影响大于降水量。

参考文献（References）

[1] ZHU L Q, ZHU W B. Research on effects of land use/cover change on soil erosion[J]. Advanced Materials Research, 2012, 433-440: 1038-1043.

[2] LATOCHA A, SZYMANOWSKI M, JEZIORSKA J, et al. Effects of land abandonment and climate change on soil erosion: An example from depopulated agricultural lands in the Sudetes Mts. SW Poland[J]. Catena, 2016, 145: 128-141.

[3] 刘闻, 曹明明, 邱海军. 气候变化和人类活动的水文水资源效应研究进展[J]. 水土保持通报, 2012, 32(5): 215-219. [LIU Wen, CAO Mingming, QIU Haijun. Progress of hydrology and water resources effects caused by climate change and human activities[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(5): 215-219.]

[4] 宋晓猛, 张建云, 占车生, 等. 气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展[J]. 水利学报, 2013, 44(7): 779-790. [SONG Xiaomeng, ZHANG Jianyun, ZHAN Chesheng, et al. Review for impacts of climate change and human activities on water cycle[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(7): 779-790.]

[5] 张利平, 李凌程, 夏军, 等. 气候波动和人类活动对滦河流域径流变化的定量影响分析[J]. 自然资源学报, 2015, 30(4): 664-672. [ZHANG Liping, LI Lingcheng, XIA Jun, et al. Quantitative assessment of the impact of climate variability and human activities on runoff change in the Luanhe River catchment[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(4): 664-672.]

[6] 周俊成. 巢湖流域径流量时间分配及趋势变化分析[J]. 治淮, 2018, 5(11): 9-11. [ZHOU Juncheng. Time distribution and trend analysis of runoff in Chaohu Lake Basin[J]. Harnessing the Huaihe River, 2018, 5(11): 9-11.]

[7] 赵华荣, 姚越, 金鑫, 等. 广西地区1960—2017年降水结构变化特征[J]. 水电能源科学, 2018, 36(12): 1-4, 20. [ZHAO Huarong, YAO Yue, JIN Xin, et al. Structure characteristics of precipitation in Guangxi region during 1960—2017[J]. Water Resources and Power, 2018, 36(12): 1-4, 20.]

[8] RIES F, SCHMIDT S, SAUTER M, et al. Controls on runoff generation along a steep climatic gradient in the eastern Mediterranean [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2017, 9: 18-33.

[9] TRANL T, O'NEILL R V. Detecting the effects of land use/land cover on mean annual streamflow in the Upper Mississippi River Basin, USA[J]. Journal of Hydrology, 2013, 499: 82-90.

[10] SUN W Y, SHAO Q Q, LIU J Y, et al. Assessing the effects of land use and topography on soil erosion on the Loess Plateau in China [J]. Catena, 2014, 121: 151-163.

[11] 王蕊, 姚治君, 刘兆飞. 西北干旱区气候和土地利用变化对水沙运移的影响——以小南川流域为例[J]. 应用生态学报, 2018, 29(9): 2879-2889. [WANG Rui, YAO Zhijun, LIU Zhaofei. Impacts of climate and land use change on water and sediment load in the northwest arid region, China: With Xiaonanchuan River Basin as a case[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(9): 2879-2889.]

[12] 刘剑宇, 张强, 陈喜, 等. 气候变化和人类活动对中国地表水文过程影响定量研究[J]. 地理学报, 2016, 71(11): 5-15. [LIU Jianyu, ZHANG Qiang, CHEN Xi, et al. Quantitative evaluations of human- and climate-induced impacts on hydrological processes of China[J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(11): 5-15.]

[13] MAHMOODI N, KIESEL J, WAGNER P D, et al. Integrating water use systems and soil and water conservation measures into a hy-

drological model of an Iranian Wadi system[J]. Journal of Arid Land, 2020, 12(4): 545-560.

[14] PIAOS L, FRIEDLINGSTEINP, CIAIS P, et al. Changes in climate and land use have a larger direct impact than rising CO_2 on global river runoff trends[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(39): 15242-15247.

[15] 夏库热·塔依尔, 海米提·依米提, 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 等. 基于小波分析的开都河径流变化周期研究[J]. 水土保持研究, 2014, 21(1): 142-146, 151. [TAHIR Shakure, YIMIT Hamid, EZIZ Mamattursun, et al. Research on period of annual runoff in Kaidu River based on wavelet analysis[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(1): 142-146, 151.]

[16] 刘纪根, 任洪玉, 牛俊, 等. 紫色土区小流域侵蚀产沙对水土保持措施的响应[J]. 水土保持研究, 2018, 25(2): 29-33. [LIU Jigen, REN Hongyu, NIU Jun, et al. Response of erosion and sediment yield to soil and water conservation measures in small watershed in Purple Soil Region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(2): 29-33.]

[17] 张富, 赵传燕, 邓居礼, 等. 祖厉河流域降水径流泥沙变化特征研究[J]. 干旱区地理, 2018, 41(1): 74-82. [ZHANG Fu, ZHAO Chuanyan, DENG Juli, et al. Change characteristics of the precipitation, runoff and sediment discharge in Zulihe River Basin[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(1): 74-82.]

[18] ZHANG F, XING Z S, ZHAO C Y, et al. Characterizing long-term soil and water erosion and their interactions with various conservation practices in the semi-arid Zulihe Basin, Dingxi, Gansu, China [J]. Ecological Engineering, 2017, 106: 458-470.

[19] 邓国卫, 王敏. 都江堰特大暴雨过程中GIS的多种面雨量计算方法对比[J]. 高原山地气象研究, 2018, 38(1): 81-86, 95. [DENG Guowei, WANG Min. Comparison of surface rainfall calculation methods for GIS during the heavy rain process in Dujiangyan [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2018, 38(1): 81-86, 95.]

[20] 祁春阳, 戴欢, 赵晓燕, 等. 基于虚拟力和泰森多边形的分布式覆盖算法[J]. 计算机工程与设计, 2018, 39(3): 606-611. [QI Chunyang, DAI Huan, ZHAO Xiaoyan, et al. Distributed coverage algorithm based on virtual force and voronoi[J]. Computer Engineering and Design, 2018, 39(3): 606- 611.]

[21] 王文圣, 丁晶, 李跃清. 水文小波分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 115-141. [WANG Wensheng, DING Jing, LI Yueqing. Hydrology wavelet analysis[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 115-141.]

[22] MARGRIET N. Wavelet analysis of rainfall-runoff variability isolating climatic from anthropogenic patterns[J]. Environ Model Software, 1999, 14: 283-295.

[23] 王蕊, 姚治君, 刘兆飞, 等. 雅鲁藏布江中游地区气候要素变化及径流的响应[J]. 资源科学, 2015, 37(3): 619-628. [WANG Rui, YAO Zhijun, LIU Zhaofei, et al. Changes in climate and runoff in the middle course area of the Yarlung Zangbo River Basin [J]. Resources Science, 2015, 37(3): 619-628.]

[24] 鞠彬, 叶文, 胡丹. 新疆额尔齐斯河流域降水量变化特征及趋势分析[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(4): 115-119. [JU Bin, YE Wen, HU Dan. Variation characteristics and trend of precipitation in Irtysh River Basin of Xinjiang[J]. Journal of Water Resources and Water engineering, 2015, 26(4): 115-119.]

[25] LU B J, LEI H M, YANG D W, et al. Separating the effects of revegetation and sediment-trapping dams construction on runoff and its application to a semi-arid watershed of the Loess Plateau[J]. Ecological Engineering, 2020, 158: 1-13.

[26] 王飞, 朱仲元, 张鹏, 等. SRM融雪径流模型在锡林河流域的应用[J]. 干旱区研究, 2019, 36(3): 575-581. [WANG Fei, ZHU Zhongyuan, ZHANG Peng, et al. Application of a snowmelt runoff model in the Xilin River Basin[J]. Arid Zone Research, 2019, 36 (3): 575-581.]

[27] 张宏芳, 李建科, 潘留杰, 等. 陕西暖季降水的日变化特征及南北差异[J]. 干旱区地理, 2020, 43(4): 889-898. [ZHANG Hongfang, LI Jianke, PAN Liujie, et al. Diurnal variation characteristics and north-south differences of precipitation in warm season in Shaanxi[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(4): 889-898.]

[28] 孙栋元, 齐广平, 马彦麟, 等. 疏勒河干流径流变化特征研究[J]. 干旱区地理, 2020, 43(3): 557-567. [SUN Dongyuan, QI Guangping, MA Yanlin, et al. Variation characteristics of runoff in the mainstream of Shule River[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(3): 557-567.]

[29] 程鹏, 孔祥伟, 罗汉, 等. 近60 a以来祁连山中部气候变化及其径流响应研究[J]. 干旱区地理, 2020, 43(5): 1192- 1201. [CHENG Peng, KONG Xiangwei, LUO Han, et al. Study on climate change and its runoff response in the middle section of the Qilian Mountains in the past 60 years[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(5): 1192-1201.]

[30] 柳冬青, 张金茜, 巩杰, 等. 陇中黄土丘陵区土地利用强度-生态系统服务-人类福祉时空关系研究——以安定区为例[J]. 生态学报, 2019, 39(2): 637- 648. [LIU Dongqing, ZHANG Jinxi, GONG Jie, et al. Spatial and temporal relations among land-use intensity, ecosystem services, and human well- being in the Longzhong Loess Hilly Region: A case study of the Anding District, Gansu Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(2): 637-648.]

[31] 秦瑞杰, 李桂芳, 李平. 降水和土地利用变化对罗玉沟流域水沙关系的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 32-37, 43. [QIN Ruijie, LI Guifang, LI Ping. Impacts of precipitation and land use change on runoff and sediment in Luoyugou watershed[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(5): 32-37, 43.]

[32] 夏露, 宋孝玉, 李怀有, 等. 砚瓦川流域水沙演变特征及其驱动因素分析[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 89-95. [XIA Lu, SONG Xiaoyu, LI Huaiyou, et al. Evolution characteristics of runoff and sediment yield and their driving factors in Yanwachuan Basin [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(1): 89-95.]

Precipitation and soil and water conservation measures intensity-runoff evolution law in semi-arid areas

HU Yan-ting[1], ZHANG Fu[1], LUO Zhu-zhu[2,3], JIN Feng[4], ZHOU Rui[5], ZHAO Xiu-lan[1], BAO Bing-chen[1]

(1 *College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou* 730070, *Gansu, China*; 2 *Gansu Key Laboratory of Aridland Crop Science/ Gansu Agricultural University, Lanzhou* 730070, *Gansu, China*; 3 *College of Resources and Environmental Sciences, Gansu Agricultural University, Lanzhou* 730070, *Gansu, China*; 4 *Gansu Provincial Department of Water Resources, Lanzhou* 730000, *Gansu, China*; 5 *College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou* 730000, *Gansu, China*)

Abstract: The evolution law and cause analysis of runoff in a climate change, principally the quantitative analysis of the impact of precipitation and soil and water conservation measures on runoff, are still hot issues in the current hydrology and water resources research. An improved understanding of the effect of rainfall and soil and water conserving practices on runoff is obligatory to manage runoff under a changing climate. The current study aims specifically to the evolution of precipitation, measures, and runoff under different periods and soil and water conservation measures. Here, the average precipitation using the Tyson polygon method was determined. The periodicity of precipitation and runoff was analyzed using the Morlet wavelet analysis. Moreover, in order to analyze the relationship between different periods of precipitation, a runoff regression analysis was performed in a controlled area. Through the construction of multivariate function, precipitation was determined, intensity was measured, and runoff evolution was predicted in Anding District, Dingxi City, Gansu Province, China in the past 60 a. The results depicted that (1) the annual runoff exhibits a decreasing trend from 1957 to 2016. The runoff decline reached a very significant level ($P<0.001$) except with the annual precipitation. On the time scale of 22−24 a, 8 a, and 4 a, the annual precipitation and runoff have obvious oscillation periods and the average period is about 15 a, 5 a, and 3 a. In the first 10 a, the runoff responded strongly to the change of precipitation and the trend was highly synergistic, indicating that this period had a better correlation. In the last 50 a, the response of the runoff to the change of precipitation is attenuated rapidly, and the trend is synergistic alienation, illustrating that the runoff change of the study area after 1986 is greatly affected by other factors, especially after 2000. (2) With the advancement of soil and water conservation work, the intensity of soil and water conservation measures such as terraces, artificial afforestation, artificial grass planting, and enclosure gradually increase to 36.14 $hm^2 \cdot km^{-2}$, 25.26 $hm^2 \cdot km^{-2}$, 11.56 $hm^2 \cdot km^{-2}$, and 3.22 $hm^2 \cdot km^{-2}$, respectively. With the implementation of soil and water conservation measures, such as conversion of cropland to forest and grassland and terracing of sloping fields, the non-controlled area is gradually transformed into the controlled area. (3) With the increase of the period (3 a, 5 a, 15 a), the effect of the same precipitation on the runoff generation increases, and the impact of the same intensity of measures on the runoff generation decreases. The combination of precipitation and measured intensity explained 57.46%−85.80% of the total variance of runoff modulus. The influence of precipitation on runoff modulus was about less than 40% and the impact of measure intensity was about 60% higher. This shows that the impact of the intensity of measures on runoff exceeds the driving force of the precipitation factor. Under the condition of no-significant changes in precipitation in the past 60 a from 1957 to 2016, the continuous decrease in runoff is due to the increase in the intensity of soil and water conservation measures. This study provides support for scientific and rational adjustment of land use structure, deployment of soil and water conservation measures, and construction of ecological environment.

Key words: evolution law; precipitation; soil and water conservation measures intensity; runoff; semi-arid area